



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 40178 A

(51) 7 H01P7/10,  
H01P11/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## Деклараційний патент на винахід

видає за винахід за Законом України  
Про охорону прав на винаходи і корисні моделі

Голова Державного Департаменту  
Інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) 2000084980

(22) 22.08.2000

(24) 16.07.2001

(46) 16.07.2001. Бюл. № 6

(72) Гейфман Ілля Натанович, Головіна Ірина Сергіївна, Гонько Тетяна Василівна

(73) Інститут фізики напівпровідників Національної Академії Наук України

(54) СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРУ ЕПР

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПРОМИСЛОВОЇ ВЛАСНОСТІ  
(УКРПАТЕНТ)

Україна, 04119, м. Київ-119, вул. Сім'ї Хохлових, 15, тел./факс 458-06-11  
Україна, МСП 04653, м. Київ-53, Львівська площа, 8, тел. 212-50-82, факс 212-34-49

№ 239/01

18" 04" 2001 р.

Міністерство освіти і науки України цим засвідчує, що  
додані матеріали є точним відтворенням первісного опису,  
формули і креслень заявки № 2000084980 на видачу патенту на  
винахід, поданої 22.08.2000

Назва винаходу:

СЕМЕТОЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ  
СПЕКТРОМЕТРУ ЕПР

Заявник:

ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

Дійсні автори:

Гейфман І.Н., Головіна І.С., Сонько Т.В.

00

VRD 111 91

Вивід відноситься до резонаторних пристроїв і може бути використаним у радіотехніці, техніці НВЧ зокрема, у техніці ЕПР-спектроскопії.

Відомий діелектричний резонатор, що дозволив підвищити чутливість спектрометру ЕПР, був виготовлений із сапфіру (R.Bichi "Sensitivity Enhancement in EPR", Bruker Report, no.1, p.45-47, 1986). Цей резонатор має форму циліндру з отвором вздовж його висоти (кільця). Розташовується сапфіровий резонатор у центрі стандартного об'ємного циліндричного резонатору з модою  $TE_{011}$  так, що вісь отвору сапфірового резонатору співпадає з силовими лініями магнітної компоненти НВЧ поля. Розміри резонатору із сапфіру: зовнішній діаметр - 10 мм, внутрішній діаметр - 5 мм, висота - 12,5 мм. Наявність навкрізного отвору дає можливість використовувати цей резонатор для дослідження широкого кола об'єктів. Його розміри були розраховані для роботи у 3-см діапазоні довжин хвиль. При дослідженні ЕПР спектру зразка ДФПГ було досягнуто підвищення співвідношення сигнал/шум у неперервному ЕПР спектрометрі у 15,8 разів. Діелектрична проникність сапфіру  $\sim 10$ . Фактор заповнення цього резонатору досягає 48%.

До недоліків цього резонатору можна віднести.

1. Обмежену ступінь підвищення чутливості спектрометру із-за невисокого значення діелектричної проникності.
2. Високу втрату матеріалу внаслідок великих розмірів резонатору.
3. Недостатню точність вимірюваних спектрів із-за присутності домішкових сигналів від резонатору (накладання спектрів спричиняє зміну форми лінії, інтенсивність і т.ін.)

Інший діелектричний НВЧ резонатор був виготовлений із монокристалічного рутилу (D.L.Carter and A.Okaya, "Electron Paramagnetic Resonance of  $Fe^{3+}$  in  $TiO_2$  (Rutile)", Phys. Rev. 113, no.6, pp.1485-1490, 1960). Рутилкові резонатори мали форму суцільного прямокутного паралелепіпеду. Об'єми цих резонаторів складали  $0,8 \text{ см}^3$  (для частот від 1,5 до 7 ГГц) та  $0,12$

одержання спектрів ЕПР у діапазоні частот від 1,5 до 120 ГГц. Позитивною рисою рутинних резонаторів є висока добротність. Так, на частотах більших 50 ГГц добротність складала ~5000 при 78 К. Але в той же час можливості застосування цього резонатору обмежувались, так, що він міг бути використаний тільки для дослідження тих парамагнітних центрів, які утворювались на стадії одержання монокристалу при його легуванні. Другим недоліком цього резонатору є анізотропія діелектричної проникності (діелектрична проникність вздовж кристалічної осі  $\epsilon_{\parallel}=170$ , а  $\epsilon_{\perp}=90$  при кімнатній температурі), що призводить до певних труднощів як при виготовленні резонатору (точність орієнтації оптичної вісі відносно геометричної) та при розміщенні його у хвильоводі (від орієнтації кристалу залежить зв'язок резонатору з хвильоводом), так і при теоретичних розрахунках конфігурації електромагнітного поля (подвоєння кількості видів Е- та Н-коливаль).

Найбільш близьким до запропонованого є сегнетоелектричний резонатор, виготовлений із титанату стронція (H.Y.Yee "Natural Resonant Frequencies of Microwave Dielectric Resonators", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-13, no.2, p.256, 1965; A.Okaya and L.F.Barash "Dielectric MW Resonator", Proc. IRE, 50, p.2081, 1962). Він має форму суцільного циліндру. Розроблені для роботи у діапазоні частот від 9 до 16 ГГц, резонатори з титанату стронція мали діаметр від 1,64 до 1,76 мм та висоту відповідно від 0,77 до 1,7 мм. При роботі їх розміщали у закороченому хвильоводі на опорі із пенопласту. Малі розміри резонаторів і, як наслідок, малі розходи матеріалу, пов'язані з високим значенням діелектричної проникності  $\epsilon$ , що при кімнатній температурі досягає 250, завдяки чому резонатори із титанату стронція дозволили значно підвищити чутливість спектрометру ЕПР і були використані для одержання сигналів ЕПР домішки  $\text{Fe}^{2+}$ , якою було пролегено монокрystal під час випрошування. При цьому фактор заповнення досягав 100%.

Недоліками резонаторів із титанату стронція є:

*ст³ (для частот від 7 до 15 ГГц). Резонатор розміщується у закороченому хвильоводі на опорі*

дослідження зменшення добротності резонатору, що спричиняється значним підвищенням

діелектричних втрат у цьому температурному інтервалі.

2. Обмеженість функціональних можливостей, що полягає у можливості застосування певного резонатору тільки для дослідження тих парамагнітних домішок, якими його було пролеговано. Для дослідження ж інших об'єктів треба легувати кристал знову (у випадку, коли таке легування можливе) і виготовляти новий резонатор.

3. Неможливість використання резонатору в області температури  $T_c=110$  К, при якій титанат стронція зазнає фазового переходу із кубічної модифікації в тетрагональну, що спричиняє появу локального максимуму в температурній залежності тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ .

В основу винаходу поставлено задачу суттєвого підвищення чутливості спектромстру ЕПР при температурах нижче 300 К, і підвищення точності вимірювання спектрів ЕПР, спрощення технології виготовлення резонатору та розширення його функціональних можливостей при будь-якій температурі.

Поставлена задача досягається тим, що сегнетоелектричний резонатор виконаний із монокристалу, який відрізняється тим, що він виконаний з танталату калія, легованого літієм з вмістом 0,01-0,1%.

Сегнетоелектричний резонатор відрізняється тим, що він виконаний у прямокутній формі.

Також сегнетоелектричний резонатор відрізняється тим, що він містить всередині отвір для розміщення досліджуваного об'єкта, причому глибина отвору складає  $1/2$  висоти резонатору.

Такий винахід може бути реалізований структурою (фіг.1), що містить сегнетоелектричний резонатор (1), який разом із розміщеним у ньому досліджуваним об'єктом (2) приклеєний до тримача (3) і разом із тримачем поміщається у середину стандартного об'ємного циліндричного резонатору із модою  $TE_{011}$  (4) таким чином, щоб вісь отвору сегнетоелектричного резонатору співпадала з силовими лініями магнітної компоненти НВЧ поля (5).

спектрометру ЕПР в об'ємному металічному резонаторі утворюється стояча НВЧ хвиля (1/2 довжини НВЧ хвилі, яка генерується клістроном). Магнітна пучність цієї хвилі співпадає з віссю об'ємного циліндричного резонатора (5 на фіг.1). Якщо у цю пучність магнітного поля помістити сегнетоелектричний резонатор, відбувається концентрація НВЧ потужності у місці знаходження сегнетоелектричного резонатора, причому найбільше підвищення значення магнітного поля спостерігається на об'єкті, який розташовується в отворі сегнетоелектричного резонатора. Оскільки запропонований матеріал резонатору має високу діелектричну проникність і водночас малі діелектричні втрати при температурах нижче 300 К, ми одержуємо значне підвищення чутливості спектрометру ЕПР особливо при низьких температурах.

Суть запропонованого винаходу полягає у наступному.

Ефективність використання сегнетоелектричних резонаторів порівняно з об'ємними металічними для підвищення чутливості спектрометру ЕПР обумовлюється значенням діелектричної проникності. Співвідношення сигнал/шум (С/Ш), яким характеризується чутливість, пропорційно падаючій НВЧ потужності  $P$ , добротності резонатору  $Q$  і фактору заповнення  $\eta$  (P.Nedvig, Acta Physica Hungaricae, 10, p.115, 1959):  $C/Ш \sim P^{1/2} \chi'' \eta Q / (NkT\Delta f)^{1/2}$  (4), де  $\chi''$  – уявна частина парамагнітної сприйнятливості зразка,  $Q$  – добротність резонатору,  $N$  – коефіцієнт шуму,  $kT$  – теплова енергія,  $\Delta f$  – ширина полоси пропускання детектора; а фактор заповнення  $\eta = H_z^2 / H^2 dV$ , де  $H_z$  – магнітне поле на зразку,  $H$  – магнітна компонента НВЧ поля у середині резонатора,  $V$  – об'єм резонатора. Звичайно  $H_z$  дорівнює амплітуді магнітного НВЧ поля у резонаторі  $H_0$ . У випадку ж розміщення у резонаторі (або хвильоводі) матеріалу з високою діелектричною проникністю та низькими втратами значення  $H_z$  та  $H_0$  стають різними, до того ж, як показали розрахунки,  $(H_z/H_0)^2 \approx \epsilon$ . Отже, завдяки високим значенням  $Q$  при в одночас високому значенню  $\epsilon$  можна досягти значного підвищення С/Ш. До того ж, сегнетоелектричний резонатор має бути простим по конструкції і одночас функціональним, його використання має бути спрощеним і не викликати

9:30PM

8000ND 7:01 AM 81:50 EPI 5002-1-NAT

Серед сегнетоелектричних кристалів, які є підгрупою діелектриків і відрізняються суттєво більшим значенням діелектричної проникності, є тільки один кристал, танталат калія, у якого при зниженні температури поряд зі значним зростанням діелектричної проникності, яка є ізотропною і досягає  $4 \cdot 10^3$  при  $T \approx 4,2$  К, спостерігається зменшення діелектричних втрат, це забезпечує високу добротність резонатору, виготовленого з цього матеріалу, навіть при дуже низьких температурах. Однак, як показали дослідження, монокристали номінально чистого танталату калія виявляють спектри ЕПР  $\text{Fe}^{3+}$ , який міститься у кристалі у вигляді некерованої домішки. Встановлено, що іони  $\text{Fe}^{3+}$  займають положення іонів калія у кристалічній ґратці танталату калія і разом з вакансією ближніх положень  $\text{K}^+$  утворюють центри ромбічної симетрії (А.Р.Реченуї et al., Phys. Rev. B 51, no.18, p.12165, 1995). Для ліквідації цих центрів і, як наслідок, досягнення чистоти кристалу з точки зору наявності "власних" сигналів ЕПР, нами запропоновано пролегувати танталат калія літієм з вмістом 0,0001-0,001 (або 0,01-0,1%). Розберемо вплив літія більш детально і обґрунтуємо його вміст.

При легуванні іони літія заміщують іони калія, причому внаслідок значної різниці в радіусах іонів  $\text{K}^+$  та іонів  $\text{Li}^+$ , іони літія займають нецентральне положення, зміщуючись в одне із шести напрямків типу  $[100]$  по відношенню до центросиметричного місця іонів калія і утворюючи. Концентрація літія вирішальним чином впливає на фазовий стан змішаних кристалів (таблиця 1). Ми контролювали вміст літія у кристалі за допомогою пламєної фотометрії. Як встановлено нами з експериментів по парелектричному резонансу, у інтервалі  $0 < x < 0,04$  знаходиться область, де іони літія не взаємодіють між собою. Це область з  $x$  від 0 до 0,008.

L:3004

х (за аналізом)	Симетрія	Фазовий стан
0	Кубічна	Вітвальний сегнетоелектрик
0 - 0,008		Полярне скло
0,008 - 0,08		Сегнетоелектрик з малими доменами
0,08 - 0,27		Кристалізація неможлива
0,27 - 0,6	Тетрагональна	$K_{1-x}Li_xTaO_3$ - Полярне скло
1		Сегнетоелектрик

Нами проведено дослідження спектрів ЕПР  $Gd^{3+}$ , введеного у якості парамагнітного зонду, у кристалах  $K_{1-x}Li_xTaO_3$  при  $0 < x < 0,038$ . Встановлено, що ширина ліній ЕПР  $Gd^{3+}$  у чистих кристалах  $KTaO_3$  складає 8 Е, ширина ліній ЕПР  $Gd^{3+}$  у змішаних кристалах  $K_{1-x}Li_xTaO_3$  при  $0 < x < 0,001$  складає 4 Е, а при подальшому підвищенні  $x$  ліній ЕПР  $Gd^{3+}$  розширюються за рахунок впливу електричних полів дефектів.

Дослідження впливу концентрації літія на діелектричну проникність, дисперсію та температуру фазового переходу дали такі результати. При  $x=0,0005$  на температурній залежності діелектричної проникності  $\epsilon(T)$  спостерігається поява піку, забов'язаного домішкою літія, а величина  $\epsilon$  зростає майже до  $4 \cdot 10^3$  і виходить на насичення при  $1,2 < T < 4,2$  К. Подальше підвищення  $x$  призводить до появи у залежності  $\epsilon(T)$  максимуму, який відповідає фазовому переходу у стан полярного скла, причому з ростом  $x$  цей максимум зміщується в сторону більш високих температур. При використанні монокристалу для виготовлення резонатору суттєвим є відсутність фазового переходу, або максимально можливе зниження температури фазового переходу. Отже, найбільш доцільним є вибір монокристалів танталату калія з вмістом літія до  $x=0,001$ . Як показали вимірювання діелектричної дисперсії у монокристалах  $KTaO_3 \cdot Li$ , при малих концентраціях домішки літія не призводить до викривлення кристалічної структури. Про це свідчить фононний механізм поляризації, який характеризує діелектричні властивості "матриці" - ґратки  $KTaO_3$ , в яку введена нецентральна домішка  $Li^+$ , і визначає величину  $\epsilon_{фон}$  у НВЧ діапазоні після дисперсії  $\epsilon'$  ( $\epsilon' = \epsilon - \epsilon''$ ). Цей механізм обумовлений м'якою модою коливань ґратки танталату калія і дає діелектричний внесок, близький до фононного внеску бездомішкового  $KTaO_3$ , що вказує на малу зміну



B:3094

залежності  $\epsilon_{\text{фон}}(T)$  температури Кюри-Вейса до  $-40^\circ\text{C}$  свідчить про те, що внутрішні електричні поля, зумовлені нецентральною зміщенням  $\text{Li}^+$ , роблять кристалічну ґратку більш "жорсткою".  $\epsilon_{\text{фон}}$  знижується, як і під дією зовнішнього електричного поля зміщення.

Таким чином, легування танталату калія незначною кількістю літія, а саме при концентрації літія від 0,01% до 0,1% (або при  $x=0,0001-0,001$ ), дає можливість одержання матеріалу:

- з високою ізотропною діелектричною проникністю та низькими діелектричними втратами, особливо при температурах нижче  $300^\circ\text{C}$ , що забезпечує значне підвищення чутливості спектрометру ЕПР при низьких температурах;
- з відсутніми "власними" сигналами ЕПР та малим ступенем дефектності завдяки чому досягається висока точність вимірювання;
- у якого нема максимуму у температурній залежності діелектричної проникності, відповідного фазовому переходу та є область насичення  $\epsilon$ , що забезпечує досягнення стабільного підвищення співвідношення сигнал/шум при низьких температурах;
- з міцною кристалічною ґраткою, що дозволяє автоматизувати етап механічної обробки при виготовленні резонатору.

Другою відзнакою запропонованого резонатору є його геометрія. Ми пропонуємо прямокутну форму резонатору. Прямокутна зовнішня форма резонатору зумовлена покращенням виготовлення порівняно з циліндричною. Окрім того, запропонований для використання матеріал  $\text{KTaO}_3\cdot\text{Li}$  має площину сколу типу  $[100]$ , що дає можливість легко обробляти його, роблячи саме плоско-паралельні зрізи.

Іншою відзнакою є наявність циліндричного отвору вздовж висоти резонатору і глибиною отвору рівною  $1/2$  висоти резонатору. Саме при цій глибині отвору досягається найбільше підвищення чутливості. Наявність же саме глухого, а не наскрізного отвору дозволяє використовувати резонатор для дослідження різноманітних об'єктів, в тому числі,

*спектру при введенні іонів  $\text{Li}^+$ . Разом з тим, дуже  
змінення  $\epsilon_{\text{фон}}$  у кристалах*

6:30H4

отвору у середині резонатору легше робити циліндричного перерізу, використовуючи звичайне свердло.

При виборі діаметру отвору треба знаходити оптимальне рішення, зважаючи як на максимально можливий об'єм зразку, так і на величину вузької частини резонатору.

Проведені нами розрахунки показали, що конфігурація поля у резонаторі визначається саме вузькою частиною кристалу. Це можна продемонструвати на такому прикладі. Якщо взяти

об'ємний прямокутний резонатор, то його розміри для роботи у 3-см діапазоні довжин хвиль ( $\sim 10$  ГГц) становлять  $23 \times 23 \times 10$  мм<sup>3</sup>. Розмір 10 мм суттєвого значення не має, два ж інших

розміри можна змінювати у невеликих межах, наприклад,  $26 \times 20 \times 10$  мм<sup>3</sup>. Але у резонатор

$30 \times 16 \times 10$  мм<sup>3</sup> хвиля не увійде, оскільки для цього робочого (частотного) діапазону

критичним розміром є 17 мм. Нехай розмір резонатору буде  $23 \times 23 \times 10$  мм<sup>3</sup>. Тоді на кожен

міліметр висоти у 23 мм припадає  $1/46$  довжини хвилі, оскільки в об'ємному резонаторі НВЧ

хвиля знаходиться у повітрі, діелектрична проникність якого  $\epsilon=1$ . Якщо ж заповнити простір

розповсюдження хвилі кварцем ( $\epsilon=2$ ), то в 1 мм кварцу розміститься  $1/23$  довжини хвилі. В 1

мм запропонованого нами матеріалу  $\text{KTaO}_3\text{:Li}$  при  $T=77$  К ( $\epsilon=826$ ) розміститься

$(1/46) \cdot \sqrt{826} = 0.625$  довжини хвилі, або 1,3 напівдовжин хвиль. Якщо ширину резонатору, у

якій розміщується така хвиля, зменшити (або перервати) отвором діаметром 0,2 мм, тоді у

$\text{KTaO}_3\text{:Li}$  поміститься  $1,3 \cdot 0,2 = 1,04$  напівдовжин хвиль та ще у повітрі (у отворі) поміститься

$(1/46) \cdot 0,2$  довжин хвиль. Але якщо на отвір випаде 0,3 мм, то цей розрахунок з урахуванням

частини хвилі у танталаті калія ( $1,3 \cdot 0,7 = 0,91$ ) та в отворі  $(1/23) \cdot 0,3 = 0,01$  дасть 0,92, тобто

напівдовжини хвилі вже не зможе поміститися. У цьому останньому випадку резонувати буде

безотвірна частина. Таким чином, при розрахунках резонансної частоти сегнетоелектричного

резонатору прямокутної форми, який містить глухий отвір, враховуючи, що конфігурацію

НВЧ хвилі визначає саме вузька частина, треба віднімати площу отвору із площі

поперечного перерізу резонатору. Тоді геометричні розміри суцільного резонатору,

еквівалентного у сенсі резонансної частоти резонатору з отвором, будуть становити: ширина

довжина сегнетоелектричного резонатору з отвором,  $d$  - діаметр отвору.

Отже, на відміну від описаного нами відомого сегнетоелектричного резонатору, наш резонатор має отвір для розміщення досліджуваного об'єкту, глибина якого становить  $1/2$  висоти резонатору. Така геометрія має дві переваги. Порівняно з рутитовими резонаторами і резонаторами із титанату стронція, які були абсолютно суцільними і внаслідок цього могли бути використаними тільки для дослідження тих домішок, якими був пролегований кристал на стадії вирощування, наш резонатор може використовуватись для вивчення рідноманітних об'єктів. Окрім того, названі резонатори розміщувались у закороченому хвильоводі, що викликало додаткові технічні ускладнення при їх використанні. Запропонований резонатор, приклеєний до тримача зразків, розміщується у середині стандартного об'ємного резонатору, що максимально спрощує його використання. Добротність запропонованого резонатору становить 5000, а фактор заповнення досягає 50%.

Приклад 1. Як приклад вибраний резонатор, зроблений із монокристалічного танталата калія, легованого 0,1% Li. Цей резонатор має прямокутну форму з глухим циліндричним отвором. Розміри і характеристики виготовлених і випробуваних нами резонаторів представлені у таблиці 2. Позначення у таблиці 2 визначають наступне:  $d$  - діаметр отвору,  $h$  - його глибина,  $L$  - висота резонатору,  $A$  і  $B$  - відповідно ширина і довжина сегнетоелектричного резонатору прямокутної форми,  $\epsilon$  - діелектрична проникність матеріалу резонатора. Зразок циліндричної форми, у якості якого був використаний сажистий вуглець, розміщений у отворі резонатору, використовувався для вимірювання фактору  $G$  - ступеня співвідношення сигнал/шум, тобто відношення величини сигнал/шум при використанні запропонованого резонатору до величини сигнал/шум у відсутності сегнетоелектричного резонатору при однаковій падаючій потужності та однаковій амплітуді модуляції поля,  $f$  - робоча резонансна частота.

$$A_p = \sqrt{(A \times B - \pi d^2/4)} + 0.5 \text{ (mm)}, \text{ довжина } B_p = \sqrt{(A \times B - \frac{\pi d^2}{4})} - 0.5 \text{ (mm)}$$

де  $A$  і  $B$  - відповідно ширина і

11:11 PM 11/23/2003 10:22 AM L.KHODOR ID:17038729306

h(мм)	L(мм)	A(мм)	B(мм)	ε	f(ГГц)	1(K)	2(K)
1,9	2,0	3,4	2,8	241	9,152	331	16
0,9	1,4	1,4	1,8	480	9,143	165	28,5
0,9	1,5	3,0	1,5	670	9,129	120	35
				345	9,250	215	37

Виготовлені сегнетоелектричні резонатори випробовувались на радіоспектрометрі RF-3075 у 3-см діапазоні довжин хвиль у широкому інтервалі температур 77 - 360 К.

У розрахунках розмірів сегнетоелектричного резонатору ми використовували два підходи.

Підхід 1. Ми використовували метод розрахунку розмірів запропонованого сегнетоелектричного резонатору для роботи на певній резонансній частоті, який полягає у знаходженні розмірів суцільного сегнетоелектричного резонатору, еквівалентного (у сенсі резонансної частоти) сегнетоелектричному резонатору з отвором, оскільки, як було показано раніше, саме вузька частина визначає конфігурацію НВЧ хвилі. Для цього зменшимо довжину та ширину резонатора на величину площі перерізу отвору  $S_0 = \pi d^2/4$ . Маємо нові значення ширини та довжини:  $A_1 = \sqrt{(A \cdot B - S_0)} + 0,5$  (мм),  $B_1 = \sqrt{(A \cdot B - S_0)} - 0,5$  (мм). Тоді резонансна частота резонатору може бути знайдена із системи рівнянь (Диэлектрические резонаторы. //Под ред. М.Е.Ильченко. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.):

$$f = (\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2)^{1/2} c / (2\pi \epsilon^{1/2})$$

$$\beta_x \lg(L\beta_z/2) = (\beta_x^2 + \beta_y^2 - \beta_0^2)^{1/2}, \quad (1)$$

де  $\beta_x = \pi/L$ ,  $\beta_y = \pi/B$ ,  $\beta_z = \delta/L$ ,  $\beta_0 = 2\pi f/c$ ;  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $L$  - ширина, довжина та висота резонатору,  $n$  - цілі числа, які відповідають коливанню  $H_{nms}$ , ( $\delta$  - частина довжини хвилі в середині резонатора уздовж його висоти,  $c$  - швидкість світла,  $\epsilon$  - діелектрична проникність резонатора,  $f$  - робоча резонансна частота.

... для резонатора № 1. Саме при цих розмірах посилення

сигналу ЕПР є найбільшим (див. таблицю 2).

Підхід 2. Та частина сегнетоелектричного резонатору, у якій нема отвору, може сама бути резонатором. Тоді на конфігурацію НВЧ хвилі частина з отвором впливати не буде, а останню хвилю не увійде. Тоді за розміри, які використовуються для розрахунку резонансної частоти за рівняннями (1) беруться величини А і В, представлені у таблиці 1.

При такому підході розрахована резонансна частота резонатору №1 становить  $f=9,242$  ГГц при  $m=2$ ,  $n=1$  і  $\delta=0,667$ .

Зазначимо, що обидва підходи розрахунку відповідають температурі максимуму  $T=331$  К для резонатору № 1 (фіг.2).

Резонатор №1 дає високу точність реєстрації спектрів ЕПР, тому що "власних" сигналів ЕПР в інтервалі температур 77-380 К зареєстровано не було.

Приклад 2. Як приклад виберемо сегнетоелектричний резонатор, виготовлений із того ж монокристалу, що і резонатор № 1, який має прямокутну форму і наскрізний циліндричний отвір. Розміри цього резонатору представлені у таблиці 2 (резонатор № 2). При розрахунку розмірів цього резонатору ми використовували підхід 1, описаний вище. Як показав розрахунок, максимальне підвищення сигналу ЕПР, що спостерігається при  $T=165$  К, може бути описано теоретично розрахованою резонансною частотою, яка точно збігається із експериментально виміряною  $f=9,143$  ГГц при  $m=2$ ,  $n=0$  і  $\delta=0,744$ . Зазначимо, що в цьому резонаторі діаметр отвору у 2 рази менший, ніж у резонаторі № 1. Це призводить до підвищення ефекту застосування резонатору (фактору G). Окрім основного максимуму G, на температурній залежності спостерігається ще два максимуми (фіг.3), які свідчать про значну ефективність застосування цього резонатору у декількох температурних інтервалах.

Приклад 3. Як приклад виберемо сегнетоелектричний резонатор, виготовлений із монокристалу  $\text{KTaO}_3$ , легованого 0,05% Li, який має прямокутну форму і циліндричний отвір, глибина якого становить 1/2 висоти резонатору. Його геометричні розміри

*Розрахунок показав, що певний збіг частот ( $f=9,069$  ГГц) має місце при розмірах*



1. Сегнетоелектричний резонатор для спектрометру ЕПР, виконаний з монокристалу, який відрізняється тим, що він виконаний з танталату калія, легованого літієм з вмістом 0,01-0,1 %.

2. Сегнетоелектричний резонатор по п.1, який відрізняється тим, що він виконаний у прямокутній формі.

3. Сегнетоелектричний резонатор по п.1 і п.2, який відрізняється тим, що він має всередині отвір для розміщення досліджуваного об'єкта, а глибина отвору складає 1/2 висоти резонатору.

Заст. директора ІФН НАН У

чл.-кор. НАН У



Олексенко П.Ф.





СЕРИЕТОЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ  
СПЕКТРОМЕТРУ ЕПР

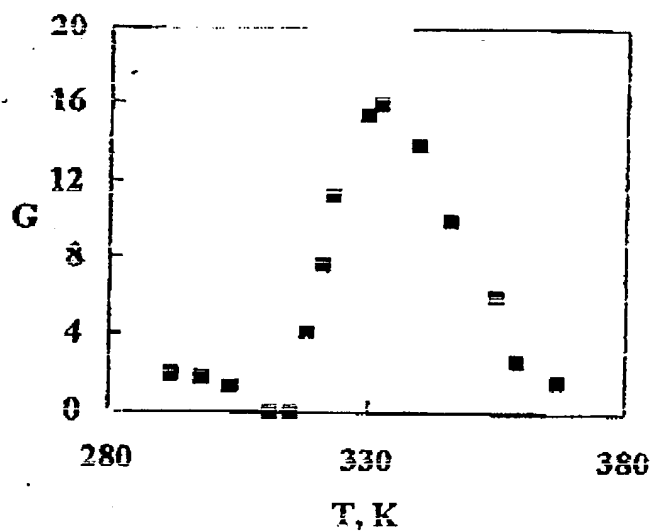


Fig.2.

Автори:

Гейфман І.Н.

Головіна І.С.

Сонько Т.В.

Сезнотое Вектрнчннн резонатор дл  
спектрометру ЕПР

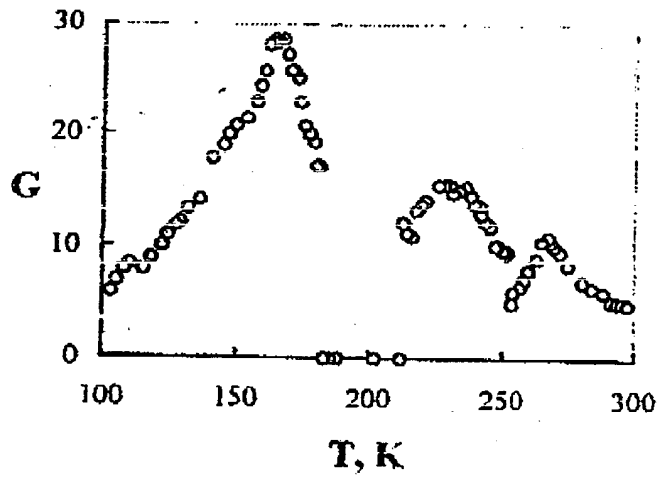


Fig.3

Автори:

Гейфман І.Н.

Головіна І.С.

Сонько Т.В.

Сегнетоэлектрический резонатор для  
спектрометра ИИР

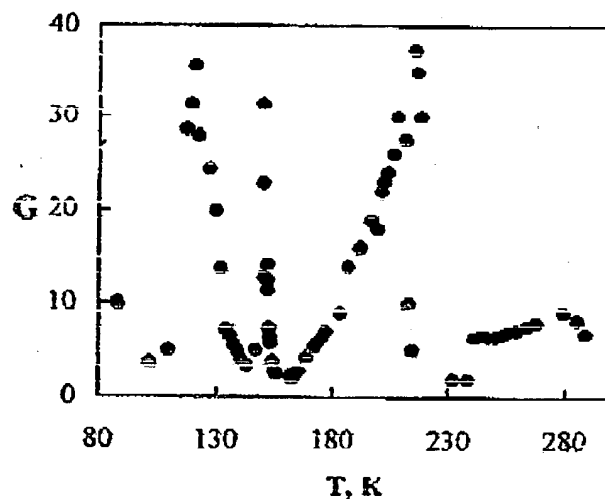


Fig. 4.

Автори:

Гейфман И.Н.

Головина И.С.

Сонько Т.В.

## Реферат

Винахід відноситься до резонаторних пристроїв і може бути використаним у радіотехніці, техніці НВЧ, зокрема, у техніці ЕПР-спектроскопії. Запропонований сегнетоелектричний резонатор виготовлений із монокристалічного танталату калія, легованого літєм з вмістом 0,01-0,1%. Резонатор має прямокутну форму і отвір для розміщення досліджуваного зразка. Глибина отвору становить 1/2 висоти резонатору. Сегнетоелектричний резонатор разом із розміщеним у ньому досліджуваним об'єктом приклеюється до тримача зразків і разом із тримачем поміщається у середину стандартного об'ємного циліндричного резонатору із модою  $TE_{011}$  таким чином, щоб вісь отвору сегнетоелектричного резонатору співпадала з силовими лініями магнітної компоненти НВЧ поля. Під час роботи спектрометру ЕПР відбувається концентрація НВЧ потужності у місці знаходження сегнетоелектричного резонатору, причому найбільше підвищення значення магнітного поля спостерігається на зразку. Оскільки запропонований матеріал резонатору має високу діелектричну проникність і водночас малі діелектричні втрати при температурах нижче 300 К, ми одержуємо значне підвищення чутливості спектрометру ЕПР особливо при температурах нижче 300 К. Досягається також висока точність вимірювання спектра ЕПР при будь-якій температурі. Прямокутна форма запропонованого резонатору полегшує обробку порівняно із циліндричною формою резонатору прототипа. Наявність отвору для розміщення зразка розширює функціональні можливості, що дає можливість дослідження різноманітних об'єктів у тому самому резонаторі.

3 з.п. ф-ли, 4 іл., 3 пр., 2 табл

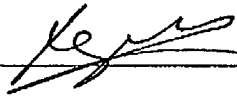
*Сегнетоелектричний резонатор для  
спектрометру ЕПР*

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

APPLICANT(S): Geifman et al  
SERIAL NO.: 10/605,251  
FILING DATE: September 18, 2003  
TITLE: Ferroelectric Single Crystal Resonator And Methods For  
Preparation And Use Thereof

**CERTIFICATE OF TRANSMISSION/ MAILING UNDER 37 C.F.R. 1.8**

I hereby certify that this correspondence, and any document(s) referred to as enclosed herein, is/are being facsimile transmitted to the USPTO or deposited with the United States Postal Service as first class mail, postage prepaid, in an envelope addressed to the Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450 on this 12 day of April 2004.

Leonid Khodor 

Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450,  
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

Submitted herewith is/are:

1. Transmittal Form;
2. Copy of IDS Citation "Ukrainian Patent (UA) 40178A" – 20 pages.